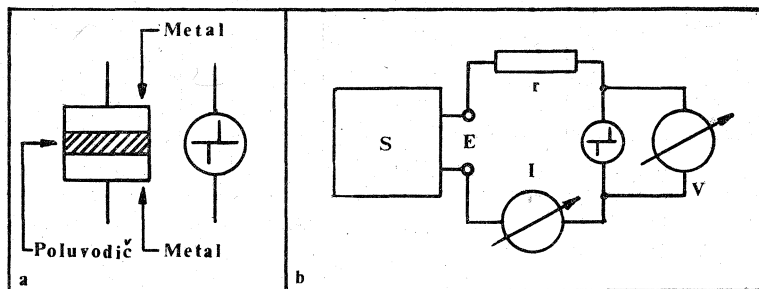


Switching efekt

Dr Z. OGORELEC, Zagreb

Velika i vrlo razgranata porodica raznih poluvodičkih elektroničkih elemenata počela se nakon 1968. godine naglo proširivati novim članovima čije se djelovanje osniva na tzv. *switching efektu*. Spomenute je godine S. R. Ovshinsky objavio svoje otkriće naglog prijelaza poluvodičkog materijala iz električki nevodljivog (visokootpornog) u električki vodljivo (niskootporno) stanje. Nagli skok u vodljivosti bio je izazvan povišenjem razlike potencijala na suprotnim stranama tankog filma određenog amorfnog poluvodiča. Budući da taj prijelaz iz gotovo izolatorskog u vodljivo stanje omogućuje prolaz struje što se može shvatiti i kao ukapčanje struje, novi je efekt dobio ime — *switching efekt*. Kao što često biva, otkriće nove pojave obećavalo je nova saznanja u fizici poluvodiča, a otvorile su se i nove mogućnosti za primjenu tih materijala. To je potaklo brojna teorijska i eksperimentalna istraživanja čija ekspanzija traje i danas. Switching efekt je zato jedan od »najmodernijih« efekata fizike poluvodiča.



Sl. 1. Struktura switching diode, njen simbol (a) i uređaj za snimanje I-V karakteristike

Između brojnih struktura za opažanje switching efekta izdvojit ćemo najlakšu za tumačenje. Ona se sastoji iz kružne metalne ili grafitne pločice na koju je vakuumskim naparavanjem nanesen tanak sloj amorfnog poluvodiča. Drugi kontakt je također metalna pločica ili kružni metalni sloj naparen u vakuumu. Takvu strukturu nazivamo *switching diodom*. Zajedno sa svojim simbolom ona je prikazana na Sl. 1a. Da bi se objasnio njezin rad i shvatile bitne osobine switching efekta, potrebno je poznavati i strujno naponsku karakteristiku diode. Ona se obično snima pomoću uređaja čija shema je dana na Sl. 1b. Slovom *S* označen je na slici izvor istosmjernje struje s varijabilnom elektromotornom silom *E*. Napon *V* i struja *I* kroz diodu mjere se odgovarajućim in-

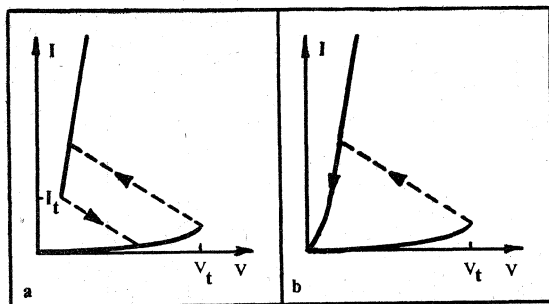
strumentima, a otpor r služi za ograničavanje struje u krugu. Njegova je uloga veoma važna jer o njemu ovisi oblik snimljene karakteristike. Mi ćemo na početku za njegovo označavanje upotrebljavati izraze »malen« i »velik«, a kasnije ćemo objasniti pravo značenje tih riječi.

Snimi li se, dakle, karakteristika diode uz neku »malu« vrijednost otpora r , dobit će se, ovisno o vrsti poluvodičkog materijala, jedna od krivulja prikazanih na (Sl. 2). U slučaju *a* kod laganog povećavanja napona V opazit će se najprije područje linearnog porasta struje I . Ona je tu vrlo mala jer se dioda nalazi u nevodljivom stanju. Kod nešto viših napona karakteristika se zakrivljuje prema većim strujama. Dioda dakle, prestaje slijediti Ohmov zakon. Na kraju, kod nekog graničnog napona V_t zbiva se switching tj. nagli prijelaz diode u vodljivo stanje duž gornje crtkane linije (Sl. 2a) čiji nagib ovisi o veličini otpora r . Napon na diodi u vodljivom stanju vrlo je nizak. Nasuprot tome, struja je velika i gotovo neovisna o naponu. U povratnom ciklusu zbivanja će biti slična. Struja će padati, a kod neke kritične vrijednosti I_t , dioda će se naglo vratiti u nevodljivo stanje (donja crtkana linija). Za oba prijelaza karakteristična je veoma velika brzina. Utvrđeno je da switching u vodljivo stanje traje svega oko 10^{-10} sekundi.

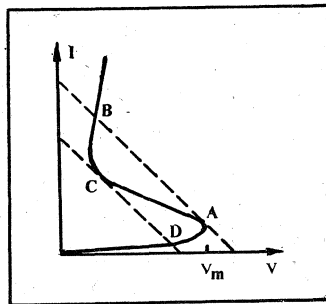
Slučaj *b* (Sl. 2b) vrlo je sličan upravo opisanom. Izostao je jedino povratni switching. Dioda je ostala u vodljivom stanju i tako, na neki način, »upamtila« električni impuls. Ova njezina memorija može se izbrisati nekim drugim električnim impulsom suprotnog polariteta.

Primjene ovih efekata mogu biti vrlo različite: od čisto električkog ukapčanja struje do elemenata memorije u računskim strojevima. Budući da se switching, osim električnim poljem, može izazvati i laserskim snopom, elektronskim zračenjem, pa čak i osvjetljavanjem običnom svjetlošću i da se pritom u raznim strukturama i raznim materijalima javljaju promjene u optičkoj refleksiji i transmisiji, zatim promjene u dielektričnoj konstanti, gustoći, adheziji i kemijskoj aktivnosti, mogućnosti primjene zaista su velike.

Fizičke osnove switching efekta. Da bi neki materijal pokazao jedan od efekata koje smo opisali, njegova statička strujno-naponska karakteristika mora imati oblik prikazan na Sl. 3 (puna krivulja). Zbog takvog oblika ona se često naziva i *S*-karakteristikom. Snimiti je možemo također pomoću uređaja sa Sl. 1b, ali uz neki »veliki« otpor r . Bitno je da *S*-karakteristika sadrži područje negativnog otpora koje se na Sl. 3 proteže približno između točaka *A* i *C*. Tu je naime, otpor materijala $R = \Delta V / \Delta I < 0$. Spomenimo uzgred da su pribori sa sličnom karakteristikom bili poznati i ranije (npr. tinjalica). Ipak, oni se zbog raznih razloga ne mogu tretirati kao pribori pogodni za switching. Ostavit ćemo ih zato po strani, a našu pažnju posvetit ćemo isključivo poluvodičima.



Sl. 2. I-V karakteristike switching diode, a) switching, b) switching s memorijom



Sl. 3. Statička I-V karakteristika materijala koji pokazuje switching efekt

Među tim materijalima *S*-karakteristika je u prvom redu svojstvo svih onih poluvodiča čija specifična vodljivost naglo raste s temperaturom. Takav porast opažamo redovito u vlastitom području vodljivosti gdje se specifična vodljivost σ mijenja s apsolutnom temperaturom T prema za konu $\sigma = \sigma_0 \exp(E_g/2kT)$. Tu je slovom k označena Boltzmannova konstanta, a slovima σ_0 i E_g konstante materijala. Najpoznatiji primjer za ovaj slučaj su *termistori*.

S-karakteristiku imat će nadalje svi oni materijali čija vodljivost također raste s temperaturom (ne nužno tako naglo kao kod termistora), ali koji na određenoj temperaturi T_c doživljavaju fazni prijelaz uz skokovito povećanje vodljivosti, ponekad i za nekoliko redova veličine. Ovdje možemo smjestiti npr. okside nekih prijelaznih metala, mnoge druge poluvodiče s promjenom kristalne strukture, zatim amorfne poluvodiče s faznim prijelazom red-nered i poluvodička stakla sa sličnim faznim prijelazom ili s prijelazom čvrsto-tekuće.

Pozabavimo se sada detaljnije ovom drugom klasom materijala i pogledajmo što se zbiva kod prolaska struje kroz diodu sa Sl. 1a u kojoj takav materijal igra ulogu poluvodičkog filma. Kod niskih napona teći će kroz diodu vrlo mala struja koja ne uzrokuje gotovo nikakvo zagrijavanje poluvodiča. Struja se dakle, mijenja s naponom prema Ohmovom zakonu. Kod nešto viših napona Jouleova toplota ne može se više zanemarivati, uzorak se grije, a zbog rastuće funkcije $\sigma = \sigma(T)$ otpor diode se smanjuje. Struja kroz nju raste brže nego dozvoljava Ohmov zakon, što znači da se karakteristika zakrivljuje. Važno je shvatiti da zagrijavanje poluvodiča nije homogeno. Centralni dio uzorka uvijek je topliji od njegove periferije u dodiru sa zrakom. Očekujemo da će se u času kad centralni dio uzorka dosegne temperaturu T_c faznog prijelaza zbivati u diodi znatne promjene. Zbog skoka u vodljivosti formirat će se u centralnom dijelu uzorka vrlo usko područje malog otpora, pa će gotovo sva struja kroz diodu pojuriti duž tog kanala. Temperatura ostalog dijela uzorka past će gotovo na temperaturu okoline. U tom trenutku na diodi ćemo imati maksimalni napon V_m . Daljnjim povećavanjem struje to se područje širi, sve veći dio poluvodičkog uzorka prelazi u vodljivo stanje i napon na diodi pada. Nalazimo se dakle, u području negativnog otpora R . Karakteristika postepeno prelazi u gotovo vertikalnu liniju, što znači da struja prestaje ovisiti o naponu.

Jasno je da se i statička karakteristika i switching efekt mogu snimiti pomoću istog uređaja. Što će se od toga opaziti ovisi o veličini otpora r . Pogledajmo dakle, što smo označavali »malim«, a što »velikim« r . U oba slučaja je napon na diodi dan relacijom $V = E - rI$. Odmah se vidi da ta relacija predstavlja u koordinatnom sustavu $I-V$ pravac kroz točke $V = E$, $I = 0$ i $V = 0$, $I = E/r$. Nazivamo ga otpornim pravcem. Budući da je njegov koeficijent smjera jednak $1/r$, promjenom otpora r mijenjamo nagib otpornog pravca. Neki »mali« otpor r definiramo uvjetom $r < |R|$, što znači da je otporni pravac strmiji od dijela statičke $I-V$ karakteristike u području negativnog otpora. »Veliki« r definira se naravno, suprotnim zahtjevom.

Switching efekt ćemo, dakle, opaziti povećavajući elektromotornu silu E izvora, pri čemu će se otporni pravac pomicati prema višim naponima V ostajući paralelan sam sebi. Uz uvjet $r < |R|$ mogu nastati ovi slučajevi (Sl. 3):

1. Otporni pravac siječe samo donji dio statičke karakteristike. Presjecište će biti radna točka diode. Ona u toj točki može ostati po volji dugo.

2. Otporni pravac siječe karakteristiku u tri točke. Pri povećavanju E stabilna će biti samo točka s najnižom strujom. Dioda se još uvijek nalazi u nevodljivom stanju.

3. Otporni pravac dira karakteristiku u točki A i siječe je u točki B. Dioda se nalazi u kritičnom stanju. Već i vrlo malo povišenje napona prebacit će radnu točku iz A u B. Taj nagli prijelaz upravo je switching. Pad napona i porast struje za vrijeme prijelaza ovisi o obliku statičke karakteristike i nagibu otpornog pravca.

4. Otporni pravac, pri smanjivanju E , dira karakteristiku u točki C. Dioda je ponovno u kritičnom stanju. Već će i malo smanjivanje struje prebaciti radnu točku naglo iz C u D. Vratili smo se, dakle, u ishodno, nevodljivo stanje.

Treba se na kraju osvrnuti na još jedan parametar switching efekta jer on duboko zadire u prirodu ove pojave. Taj parametar je vrijeme prijelaza. Već smo spomenuli da je ono vrlo kratko, desetak do stotinu pikosekundi ako se radi o amorfnim poluvodičima ili poluvodičkim staklima. Kroz to vrijeme moraju biti završeni svi prijelazni procesi switchinga i dioda mora biti prebačena iz jednog potpuno ravnotežnog u drugo potpuno ravnotežno stanje. Odmah na početku istraživanja switching efekta posumnjalo se u to da bi, po prirodi spori procesi, kao što su strukturni fazni prijelazi, grijanje i hlađenje, mogli biti završeni u tako kratkom vremenu. Sumnju su opravdali i eksperimenti koji kod brzih switchinga bez memorije nisu mogli otkriti promjene u strukturi materijala. U mehanizmu switchinga moraju dakle, sudjelovati i neki drugi, elektronički procesi kod kojih ne dolazi do promjena u kristalnoj strukturi materijala, već se mijenja samo struktura energetske vrpce i lokaliziranih energetske nivoa elektrona. Naravno, ti su procesi dovoljno brzi da bi se smjestili unutar prijelaznog vremena. Sve ovo što smo ovdje naveli ipak su, više ili manje, samo spekulacije. Bit procesa u switching efektu otkrit će vjerojatno buduća istraživanja.

Materijali. Iako se, prema izlaganjima u prethodnom poglavlju, switching efekt može opaziti u velikom broju poluvodičkih materijala, zahtjevi primjene drastično reduciraju izbor. Težnja za što kraćim prijelaznim vremenima svela je zapravo izbor materijala gotovo isključivo na poluvodička stakla. Tehnologija je u toj grupi nastojala usavršiti materijale u dva smjera: u stabilne amorfne materijale bez promjena u strukturi — za normalni switching i u amorfne materijale s reverzibilnim promjenama u strukturi — za switching s memorijom. Pod promjenom u strukturi materijala treba ovdje smatrati prijelaz iz amornog u neko sredenije ili čak kristalinično stanje. Prema tome, za normalni switching žele se kreirati takvi materijali koji će u svim uvjetima rada diode ostati u amornom stanju. Čini se da danas tom zahtjevu najviše odgovara ternarna staklasta legura $\text{Te}_{33}\text{As}_{27}\text{Ge}_{20}\text{S}_{20}$.

Promjenom sastava tog istog materijala ili točnije, smanjivanjem sadržaja arsena, germanija i sumpora, a povećavanjem sadržaja telura (npr. do sastava $\text{Te}_{81}\text{As}_2\text{Ge}_{15}\text{S}_2$) može se leguru dovesti u dosta oštro metastabilno stanje. Za vrijeme switchinga nastaju uvjeti pod kojima ta metastabilna faza veoma lako prelazi u kristaliničnu fazu. U njoj materijal može ostati po volji dugo i ona predstavlja njegovo vodljivo stanje. Razlike u specifičnom otporu materijala u vodljivom i nevodljivom stanju vrlo su velike. Staklasto stanje ima specifični otpor između 10^5 i $100 \Omega\text{cm}$. Nakon prijelaza u kristaliničnu fazu otpor padne na svega oko $10 \Omega\text{cm}$. Ovaj materijal će zato biti veoma pogodan za izradu dioda s memorijom.

U daljnji pregled materijala nema smisla ulaziti jer je to područje vrlo široko i brzo se mijenja. Nije pretjerano reći da brojna istraživanja mogu sutra učiniti zastarjelim ono što smo hvalili danas.